Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 2. 2024. (31-50)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Effects of Al_2O_3 Nano-Particles on Mechanical Properties of Lead Foams*

Research Article

Hamid Sazegaran[1], Hadi Nasiri[2]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85145.1128

1. Introduction

Metal foams or cellular metals are a class of emerging engineering materials that, due to their unique chemical, physical, and mechanical properties, can potentially replace many engineering materials in industries that require lightweight materials. This class of materials can be successfully used in many structural and non-structural applications such as filters, shock absorbers, thermal and sound insulation, lightweight walls, heat exchangers, energy absorbers, flame arresters, electromagnetic shields and light structures.

Most metals and alloys can potentially be used to produce metal foams or porous structures. As we know, steels are a widely used category of engineering alloys, which, due to having special physical and mechanical properties such as high hardness and strength, high elongation percentage, good durability and creep resistance, high malleability, excellent wear resistance, hard capability, relatively good weldability and machinability, and good corrosion behavior in most working environments can be successfully used in the construction and production of steel foams.

In this research, the main goal is to produce lead foams by powder metallurgy method and using urea grains as spacers. In addition, the effect of adding alumina nanoparticles (0, 0.1, 0.2, 0.4 and 0.8% wt.) on the porosity, cell wall microstructure and compressive behavior of lead foams has been studied.

2. Materials and Method

As can be seen, lead particles have irregular shapes and no corners, while alumina nanoparticles have almost spherical shapes. Of course, the largest amount of lead particles is around 62 micrometers and the largest amount of alumina nanoparticles is around 57 nm. In addition, urea grains with the chemical formula CH_4N_2O, which are white in color and have a granular or ball-like physical form and have a very high solubility in distilled water, were used as spacers. Urea beads were obtained from Merck and they have a diameter of 1.5 to 2 mm, which are depicted in Figure 1.



Fig 1- Urea granule.

The process of squeezing coated urea grains was done by a steel mold and with the help of a hydraulic press. The material of the mold used was L316 austenitic stainless steel, and the tool used was selected from high-speed steel. The mold used has a cylindrical cavity with a height of 300 mm and an inner diameter of 12 mm. It should be kept in mind that shaft also has an external diameter of 12 mm and a length of 400 mm. The used hydraulic press has a capacity of 40 tons and is equipped with a pressure gauge. At this stage, the coated urea grains are poured into the cavity of the steel mold and the pressing process was carried out with a pressure of 180 MPa.

3. Results and Discussion

The rate of urea removal according to the number of immersion steps is depicted in Figure 2. According to the figure, with the increase of immersion frequency, the dissolution rate of urea grains in distilled water increases. In addition, it can be seen that the addition of alumina nanoparticles to the foam samples does not have much effect on the rate of dissolution of urea grains. It is interesting to note that the dissolution slope of urea grains in the first stage of immersion is much higher than in other stages.

* Manuscript received: November 1, 2023, Revised, December 30, 2023, Accepted, March 16, 2024 .

[1] Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran. **Email**: h.sazegaran@qiet.ac.ir

[2] Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

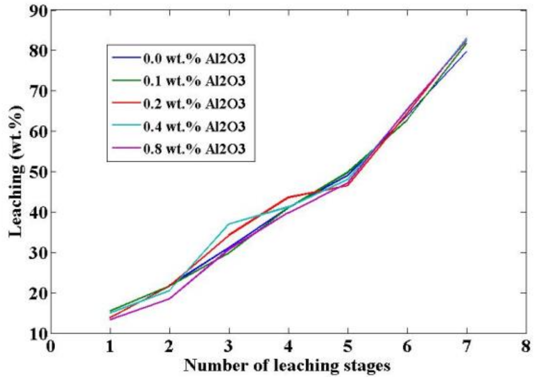


Fig 2- The dissolution rate of urea grains according to the number of immersion times for production samples with different amounts of alumina nanoparticles.

The porosity of lead foams containing different amounts of alumina nanoparticles is shown in Figure 3. According to the figure, with the increase in the amount of alumina nanoparticles to the wall of lead foams, the porosity increases. In other words, adding alumina nanoparticles reduces the density of lead foams. Of course, it should be noted that the average porosity in all studied samples is 81.25% and the difference in porosity between the sample without alumina and the sample containing 0.8% by weight of alumina is approximately 3%, which is a relatively small difference.

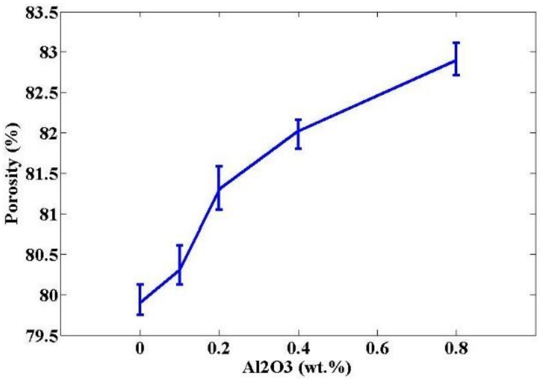


Fig 3- The amount of porosity in terms of weight percentage of alumina added to lead foams.

In addition to the amount of porosity, the microstructure of the cell walls in metal foams will also strongly influence their mechanical behavior. In Figure 4, the light microscope and scanning electron microscope images of the cell wall microstructure in the manufactured foams are shown. During the sintering process, the phenomenon of atomic penetration occurs at the boundaries of lead powder particles, as a result, the particles are connected to each other. In the pressing stage, the powder particles are mechanically connected to each other, but many holes remain between them.

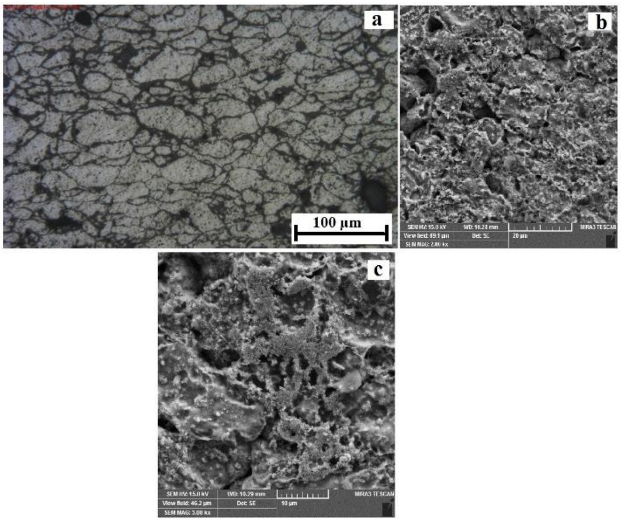


Fig 4- Images a) Light microscope of cell wall microstructure in lead foam without alumina, b) Scanning electron microscope of lead foam containing 0.1% wt. of alumina and c) Scanning electron microscope of lead foam containing 0.3% wt. of alumina.

4- Conclusion

1 -The dissolution of urea grains was done in distilled water during seven stages and more than 80% of urea by weight was removed.

2 -During the sintering process, the lead grains were well connected to each other and the cell walls were formed with an average thickness of about 189 µm.

3 -The addition of alumina nanoparticles has increased the porosity of lead foams by about 3.75%.

4 -The cells formed in lead foams have spherical shapes and alumina nanoparticles are uniformly distributed in the walls of the cells.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۵، ۲، ۱۴۰۳. (۵۰-۳۱)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

اثر افزودن نانوذرات آلومینا بر ویژگی‌های فشاری فوم‌های سرب*

مقاله پژوهشی

حمید سازگاران [۱] هادی نصیری [۲]

DOI: 10.22067/jmme.2024.85145.1128

چکیده فوم‌های فلزی دسته‌ای نوظهور از مواد مهندسی هستند که به دلیل ویژگی‌های منحصربه فرد می‌توانند در بسیاری از کاربردهای صنعتی به کار برده شوند. در این پژوهش، فوم‌های سربی حاوی نانوذرات آلومینا (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی) به روش متالورژی پودر مبتنی بر استفاده از فضاساز قابل انحلال (دانه‌های اوره) تولید شدند. نحوه‌ی انحلال دانه‌های اوره، میزان تخلخل و رفتار فشاری فوم‌های تولیدی و همچنین ریزساختار دیواره سلول‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در طی فرآیند غوطه‌وری چندمرحله‌ای، حدود ۸۰ درصد وزنی از دانه‌های اوره، پس از هفت مرحله، انحلال یافتند. تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری نشان داد که اتصال بسیار خوبی بین ذرات پودر سرب بعد از تف‌جوشی ایجاد شده است. علاوه بر این، با افزایش درصد وزنی نانوذرات آلومینا، میزان تخلخل فوم‌های سربی که در محدوده ۸۰ تا ۸۳ درصد اندازه‌گیری شده است، افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه‌های اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی بیانگر توزیع نسبتا یکنواخت نانوذرات آلومینا در دیواره سلول‌ها است. رفتار فشاری فوم‌های سربی ابتدا با افزودن نانوذرات آلومینا (۰/۱ درصد وزنی) افت می‌کند و سپس، با افزایش آن‌ها تا ۰/۴ درصد وزنی بهبود و در ادامه، در نمونه‌های حاوی ۰/۸ درصد وزنی آلومینا کاهش رخ می‌دهد.

واژه های کلیدی فوم سرب، نانو-ذرات آلومینا، تخلخل، ریزساختار، ویژگی‌های فشاری.

Effects of Al_2O_3 Nano-Particles on Mechanical Properties of Lead Foams

Hamid Sazegaran Hadi Nasiri

Abstract *Metallic foams are a new class of engineering materials using in many industrial applications due to their unique properties. In this work, lead foams containing alumina nano-particles (contains from 0, 0.1, 0.2, 0.4 and 0.8 wt. %) are manufactured through powder metallurgy technique using urea granules as leachable space holders. The leaching behavior of urea granules, porosity contents and compression properties of lead foams and also, microstructure of cell walls by optical and field emission scanning electronic microscopes are investigated. The results show about 80% of urea granules dissolved in seven stages of leaching processes. The optical images proved a good agglomeration of lead powder particles. By increasing the nano-alumina particles, the porosity content of manufactured foams that is in the range of 80-83% is increased. The images of FESEM and X-ray spectroscopic maps show the uniform distribution of alumina nano-particles in the cell walls. The compression properties of manufactured foams, by increasing the alumina nano-particles to 0.1 wt.% first decreases, then after 0.4 wt.% enhanced, and finally in the 0.8 wt.% of nano-particles goes down again.*

Keywords Lead foam, Al_2O_3 nano-particles, Porosity, Microstructure, Compressional properties.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۸/۱۰و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۲/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

Email: h.sazegaran@qiet.ac.ir

(۲) استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، ایران.

مقدمه

فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی دسته‌ای از مواد مهندسی نوظهور هستند که به دلیل ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد می‌توانند به صورت بالقوه جایگزین بسیاری از مواد مهندسی در صنایع نیازمند مواد سبک‌وزن باشند [1-3]. این دسته از مواد می‌توانند به صورت موفقیت‌آمیز در بسیاری از کاربردهای ساختاری و غیرساختاری همانند فیلترها، ضربه‌گیرها، عایق‌های حرارتی و صوتی، دیواره‌های سبک‌وزن، مبدل‌های حرارتی، جاذب‌های انرژی، شعله‌گیرها، حفاظ‌های الکترومغناطیس و سازه‌های سبک به کار برده می‌شوند [1,2]. ویژگی‌های جالب توجه فوم‌های فلزی شامل: چگالی پایین و وزن کم، استحکام فشاری نسبتا خوب، سفتی بالا، غیرسمی بودن، قابلیت جذب انرژی زیاد، مقاومت خوب در برابر احتراق، بازیافت راحت و رفتار حرارتی و صوتی منحصر به فرد است که کاربردهای روزافزون این دسته از مواد را تضمین می‌کنند [3,4]. فلزات مختلف همانند آلومینیوم [5,6]، مس [7]، تیتانیوم [8,9]، فولاد [10-13]، طلا [14] و ... می‌توانند به شیوه‌های تولید مختلف به صورت سلولی تولید شوند.

فوم‌های فلزی به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که رفتار شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [1]. در حالت کلی، فرآیندهای تولید فلزات سلولی یا فوم‌های فلزی را می‌توان به چهار دسته اصلی ۱) تولید از حالت مایع یا مذاب، ۲) تولید حالت از جامد، ۳) تولید از حالت بخار یا گاز و ۴) تولید از یون‌های محلول تقسیم‌بندی کرد. روش‌های تولید از مذاب اغلب شامل تولید به روش مستقیم [2,3]، انجماد یوتکتیک گاز و جامد (معروف به روش گازار) [15]، ذوب کردن پودرهای فشرده شده به همراه یک عامل حباب‌ساز [16]، فوم‌سازی به روش پاشش [17] و روش‌های مختلف ریخته‌گری [18-20] است. روش‌های تولید از حالت جامد شامل تف‌جوشی پودرها و یا الیاف [21]، روش به دام افتادن گاز [22]، فوم‌سازی دوغابی [23,24]، استفاده از فضاسازها در میان پودرها [25-29]، تف‌جوشی واکنشی [30] و ساختارهای حاوی گوی‌های توخالی [31,32] است. باید در نظر داشت که رسوب از بخار و رسوب از یون‌های محلول درون یک حلال نیز جزء دو دسته آخر به محسوب می‌شوند [33].

مواد فومی و ساختارهای متخلخل فراوانی در طبیعت وجود دارد که نمونه‌های از آن‌ها شامل استخوان، اسفنج و ساختارهای لانه نبوری همانند چوب و چوب پنبه هستند. قابل توجه است که این مواد متخلخل طبیعی دارای ویژگی‌های مکانیکی بسیار عالی در شرایط کاری خود هستند و اغلب الزامات بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی طبیعی را برآورده می‌سازند [34]. باید در نظر داشت که ایده اولیه تولید فوم‌های فلزی از فوم‌ها و ساختارهای متخلخل طبیعی الهام گرفته است. در حالت کلی، فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی به دو دسته اصلی فوم‌ها با سلول‌های باز و فوم‌های با سلول‌های بسته تقسیم‌بندی می‌شوند [1-4]. علاوه بر این، برخی از فوم‌های فلزی حاوی مخلوطی از سلول‌های باز و بسته هستند. باز یا بسته بودن سلول‌ها تاثیر متفاوتی بر روی ویژگی‌ها و رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی دارد. به عنوان مثال، فوم‌های آلومینیومی سلول باز، رفتار مکانیکی کاملا متفاوت با فوم‌های آلومینیومی سلول بسته دارند [35-37].

اغلب فلزات و آلیاژها به منظور تولید فوم‌های فلزی و یا ساختارهای متخلخل می‌توانند به صورت بالقوه به کار گرفته شوند. همان طور که می‌دانیم، فولادها دسته‌ای پرکاربرد از آلیاژهای مهندسی هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ویژه همانند سختی و استحکام بالا، درصد ازدیاد طول زیاد، حد دوام و مقاومت به خزش خوب، چکش‌خواری زیاد، مقاومت به سایش عالی، قابلیت سخت شدن زیاد، قابلیت جوشکاری و قابلیت ماشین‌کاری نسبتا خوب و رفتار خوردگی مناسب در اغلب محیط‌های کاری می‌توانند به صورت موفقیت‌آمیز در ساخت و تولید فوم‌های فولادی به کار برده شوند [2,38-40]. فوم‌های فولادی در ساخت داربست‌های استخوانی [41]، سینک‌های حرارتی [42]، حفاظ‌های تداخل الکترومغناطیسی [43]، قطعات در معرض بارگذاری سیکلی [44]، قطعات دما بالا [45] و بسیاری از سازه‌های سبک وزن به کار برده می‌شوند. علاوه بر این، فوم‌های فولاد زنگ‌نزن که مقاومت به خوردگی بسیار عالی و قابلیت سازگاری با بدن

انسان را دارند در ساخت ایمپلنت‌های دندانی به کار گرفته می‌شوند [46].

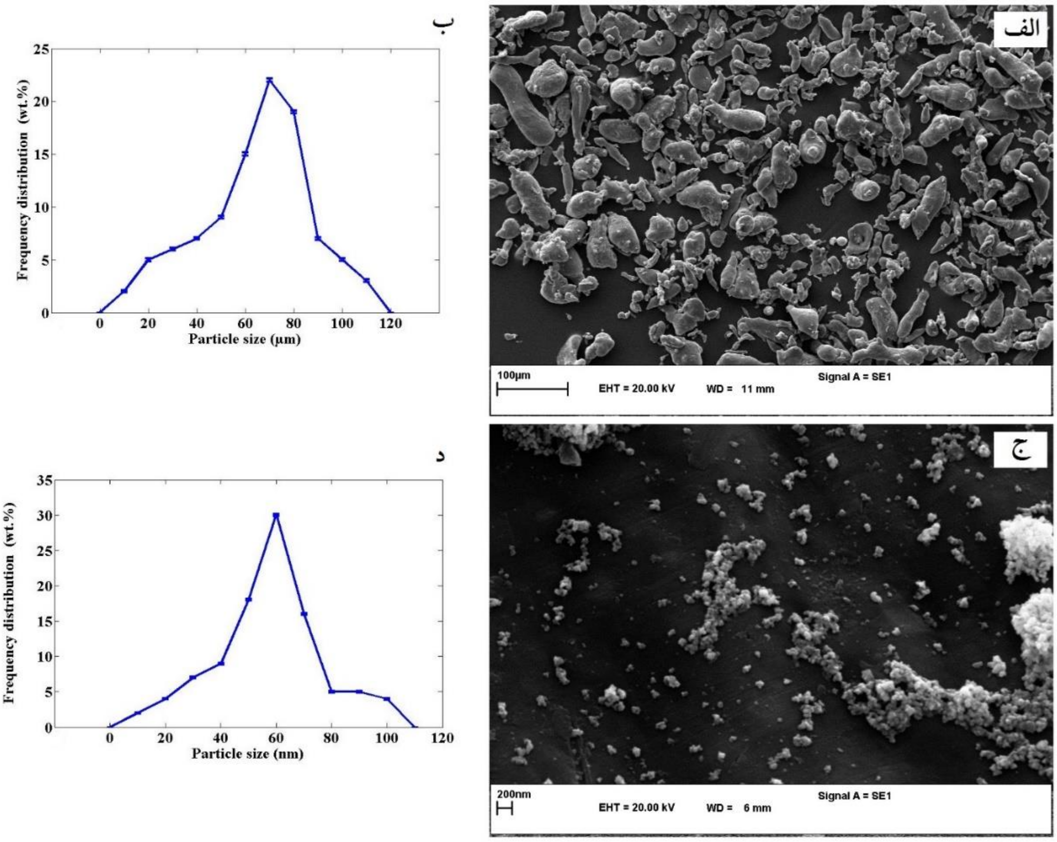
در میان فلزات و آلیاژهای غیرآهنی، آلومینیوم و آلیاژهایش به خاطر داشتن چگالی پایین، رسانایی حرارتی زیاد، شکل‌پذیری خوب، قابلیت عملیات حرارتی و مقاومت به خوردگی بالا نیز به عنوان یکی از گزینه‌های جالب توجه برای ساخت دیواره سلول‌ها در فوم‌های فلزی محسوب می‌شود [47,48]. علاوه بر این، سایر فلزات و آلیاژهای غیرآهنی نیز در ساخت و تولید فوم‌های فلزی می‌توانند استفاده شوند که در ادامه به برخی از آن‌ها به عنوان مثال پرداخته می‌شود. فوم‌های مسی در تولید قطعات و مواد تغییر فاز دهنده [49]، تجهیزات انتقال‌دهنده حرارت [50-52]، سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی [53] و ... به کار برده می‌شوند. شایان ذکر است که فوم‌های منیزیم [54-56]، تیتانیوم [57-59]، نیکل [60,61]، روی [62,63] و طلا [64] نیز به صورت گسترده و به روش‌های مختلف تولید می‌شوند و در کاربردهای متنوع ساختاری و غیرساختاری استفاده می‌شوند. با توجه به این که سرب، فلزی نرم، چکش‌خوار و شکل‌پذیر با مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی است، بنابراین، فوم‌ها سربی می‌توانند به صورت بالقوه در بسیاری از کاربردها همانند صفحات باطری‌ها، عایق‌های صوت و محافظ‌های اشعه‌های ایکس و گاما به کار گرفته شوند [65,66]. تولید فوم‌های سربی به روش متالورژی پودر اغلب سبب ایجاد سلول‌هایی با ریخت‌شناسی یکسان می‌گردد که در نتیجه، بر رفتار فیزیکی و مکانیکی فوم تولیدی تاثیر مثبت دارد [67,68]. هر چند مطالعات فراوانی بر روی تولید فوم‌های فلزی مختلف به روش متالورژی پودر صورت گرفته است، اما اطلاعات چندانی در زمینه تولید فوم‌های سربی به روش‌های مبتنی بر متالورژی پودر وجود ندارد. در این پژوهش، هدف اصلی تولید فوم‌های سربی به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضاساز است. علاوه بر این، اثر افزودن نانوذرات آلومینا (۰، ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۸ درصد وزنی) بر میزان تخلخل، ریزساختار دیواره سلول‌ها و رفتار فشاری فوم‌های سربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش انجام آزمون‌ها

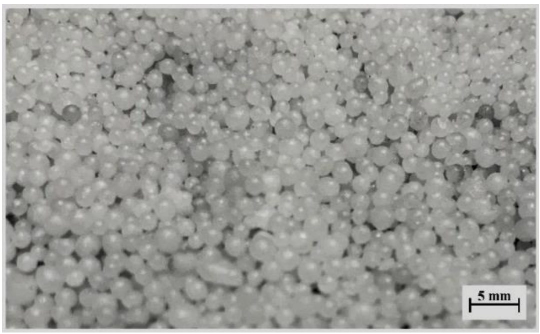
مواد اولیه و روش تولید فوم‌های سربی

به منظور تولید فوم‌های سربی به روش متالورژی پودر، از مجموعه‌ای از پودرهای سرب و فضاساز (یا همان پرکننده فضا) استفاده شد. پودر سرب (۹۹/۹ درصد وزنی سرب) که یک پودر تجاری بوده و از شرکت متالورژی پودر خراسان تهیه شده است و پودر آلومینا (۹۹/۹۹ درصد وزنی اکسید آلومینیوم) که در مقیاس نانو بوده و از شرکت مهندسی پایدار ابتکار آرمینا تهیه شده است، به عنوان مواد سازنده دیواره سلول‌ها استفاده شده‌اند. ریخت و توزیع ذرات پودرهای سرب و آلومینا در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ذرات سرب دارای اشکال نامنظم و بدون گوشه و این در حالی است که نانوذرات آلومینا دارای اشکال تقریبا کروی‌شکل هستند. البته، بیشترین مقدار ذرات سرب در حدود ۶۲ میکرومتر و بیشترین مقدار نانوذرات آلومینا در حدود ۵۷ نانومتر است. علاوه بر این، دانه‌های اوره با فرمول شیمیایی CH_4N_2O که سفید رنگ بوده و شکل فیزیکی آن گرانول یا گوی‌مانند است و حلالیت بسیار بالایی در آب مقطر دارد، به عنوان فضاساز استفاده شد. دانه‌های اوره از شرکت مرک تهیه شدند و آن‌ها دارای قطر ۱/۵ تا ۲ mm هستند که در شکل (۲) به تصویر کشیده شده‌اند.

فرآیند تولید فوم‌های سربی به روش متالورژی پودر و با استفاده از فضاساز انجام شد. پنج مرحله اصلی تولید فوم‌های سربی شامل: الف) تهیه مخلوط‌های پودری، ب) پوشش دادن مخلوط‌های پودری بر روی دانه‌های اوره ، ج) فشردن دانه‌های اوره پوشش داده شده توسط پرس هیدرولیک، د) غوطه‌وری و انحلال اوره درون آب مقطر و ه) فرآیند تف‌جوشی است. پنج مخلوط از پودرهای متفاوت سرب و آلومینا به منظور تولید فوم‌های سربی تهیه شد که در ترکیب شیمیایی آن‌ها و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی در جدول (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است که توزین نمونه‌ها توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ g صورت گرفت. همه نمونه پودری تهیه شده به مدت ۳۰ min دقیقه درون یک مخلوط‌کن مخصوص متالورژی پودر مخلوط شدند. سرعت چرخش دستگاه برابر ۱۵۰ rpm انتخاب گردید.



شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر سرب، (ب) توزیع ذرات پودر سرب، (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر آلومینا و (د) توزیع ذرات پودر آلومینا



شکل ۲ دانه‌های اوره

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مخلوط‌های پودری و شیوه نام‌گذاری فوم‌های سربی

نام نمونه	آلومینا (درصد وزنی)	سرب (درصد وزنی)
(۱)	۰	باقیمانده
(۲)	۰/۱	باقیمانده
(۳)	۰/۲	باقیمانده
(۴)	۰/۴	باقیمانده
(۵)	۰/۸	باقیمانده

دومین مرحله در تولید فوم‌های سربی، پوشش دادن دانه‌های اوره توسط مخلوط‌های پودری تهیه شده است. در این مرحله، پوشش دادن درون یک محفظه استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن که با سرعت ۱۵۰ rpm و به مدت ۳ دقیقه می‌چرخد، صورت گرفت. ۴۰ g از مخلوط‌های پودری به همراه ۴۰ g از دانه‌های اوره (با نسبت یک به یک درون محفظه وارد شدند و ۲ درصد وزنی آب مقطر به عنوان عامل ایجادکننده چسبندگی سطوح خارجی دانه‌های اوره توسط یک اسپری به درون محفظه پاشیده شد. با شروع چرخش محفظه، آب مقطر در تماس با سطوح دانه‌های اوره قرار می‌گیرد و سپس، انحلال سطحی دانه‌های اوره سبب ایجاد چسبندگی می‌گردد. سپس، ذرات پودرهای درون محفظه به سطوح خارجی چسبنده دانه‌های اوره می‌چسبند. در ادامه، فرآیند خشک کردن درون یک کوره دما پایین با دمای ۷۵ °C و به مدت ۴ hr صورت گرفت.

به منظور تولید نمونه‌های خام اولیه، فرآیند فشردن دانه‌های

اوره پوشش یافته شده توسط یک قالب فولادی و به کمک یک پرس هیدورلیک انجام شد. جنس قالب مورد استفاده از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L و سمبه استفاده شده از جنس فولاد تندبر انتخاب شد. قالب مورد استفاده دارای یک حفره استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۳۰۰ mm و قطر داخلی ۱۲ mm است. باید در نظر داشت که سمبه نیز دارای قطر خارجی mm ۱۲ و طول ۴۰۰ mm است. پرس هیدرولیک به کار برده شده دارای ظرفیت ۴۰ تن است که به گیج اندازه‌گیری فشار تجهیز شده است. در این مرحله، دانه‌های اوره پوشش داده شده به درون حفره قالب فولادی ریخته می‌شوند و فرآیند فشردن با فشار ۱۸۰ MPa انجام شد. در فشارهای بالاتر، احتمال شکستن دانه‌های اوره و در فشارهای پایین‌تر، خطر استحکام بیش از حد پایین نمونه‌های اولیه وجود دارد [13]. در نهایت، نمونه‌های خام فشرده شده با استفاده از نیروی فشاری سمبه پرس از درون قالب خارج شدند.

در چهارمین مرحله، غوطه‌وری نمونه‌ها درون آب مقطر و انحلال دانه‌های اوره از درون نمونه‌های خام اولیه صورت گرفت. به منظور جلوگیری از تخریب آنی دیواره سلول‌ها، فرآیند غوطه‌وری به صورت چندمرحله‌ای انجام شد. آب مقطر با دمای ۴۰ °C برای انحلال دانه‌های اوره به کار برده شد. در هر مرحله از فرآیند غوطه‌وری، نمونه‌ها به صورت مجزا درون ظروف حاوی آب مقطر به مدت ۲ min قرار داده شدند و در نتیجه، مقداری از دانه‌های اوره درون آب انحلال یافت. در ادامه، خشک کردن در دمای ۷۵ °C به مدت ۱ h صورت گرفت. فرآیند غوطه‌وری و خشک کردن به تعداد ۷ مرتبه و به صورت متوالی بر روی نمونه‌های خام صورت گرفت. شایان ذکر است که مقدار اندکی از اوره درون نمونه‌ها باقی می‌ماند که در مرحله تف‌جوشی به صورت حرارتی تجزیه می‌گردد. باید در نظر داشت که باقیماندن مقادیر زیاد اوره سبب تشکیل بیش از حد گازهای ناشی از تجزیه حرارتی اوره می‌شود که تخریب نمونه‌ها در مرحله تف‌جوشی را به همراه خواهد داشت [69,70].

در انتها، فرآیند تف‌جوشی بر روی نمونه‌های غوطه‌ور شده در آب مقطر صورت می‌گیرد. تف‌جوشی در کوره تیوبی مقاومتی با جداره کاربید سیلیسیم (ساخت شرکت آذر کوره، مدل ۱۵۰۰–TF۵/۲۵) در دمای ۲۶۵ °C به مدت ۲ h در اتمسفر آرگون (با خلوص ۹۹/۹۹) صورت گرفت. کوره مورد استفاده دارای سه بخش اصلی است که شامل: بخش گازرسانی، بخش حرارت‌دهی و و بخش خلاءسازی می‌باشد. بعد از خروج نمونه‌ها از درون کوره، فوم‌های سربی حاوی مقادیر گوناگون نانو-ذرات آلومینا تولید شدند.

اندازه‌گیری تخلخل

میزان چگالی و درصد تخلخل فوم‌های سربی به روش اندازه‌گیری ابعادی و توزین نمونه‌های فومی تولید شده تعیین گردید. برای تعیین میزان چگالی فوم‌های تولیدی از معادله (۱) و به منظور تعیین درصد تخلخل آن‌ها از معادله (۲) استفاده شد [13]. قابل ذکر است که در معادله (۲)، چگالی جامد همان چگالی سرب بدون تخلخل برابر ۱۱/۳۴ g/cm^3 در نظر گرفته شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۱)$$

$$P = \left[۱ - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S}\right)\right] \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

که در معادلات فوق، ρ میزان چگالی، m جرم، V حجم، P درصد تخلخل، ρ_F چگالی قطعه فومی و ρ_S چگالی جامد یا چگالی سرب بدون تخلخل است.

ریزساختار دیواره سلول‌ها

به منظور مطالعه اندازه، شکل و توزیع سلول‌ها و همچنین بررسی ریزساختار دیواره سلول‌ها از ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری (LM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) استفاده شد. ابتدا، نمونه‌های فومی توسط دستگاه وایرکات (DK7735 CNC EDM wire cut machine) در جهت عمود به محور نمونه‌های استوانه‌ای برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری به ترتیب بر روی آن‌ها صورت گرفت. فرآیند حکاکی در محلول حاوی اسید سیتریک، اسید نیتریک و آب دیونیزه صورت گرفت. قابل ذکر است که ابتدا نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مورد مطالعه قرار گرفتند. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی فازهای گوناگون از اسپکتروسکوپی اشعه

ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی استفاده شد. اندازه‌گیری ضخامت دیواره سلول‌ها در تصاویر میکروسکوپی توسط نرم‌افزار Clemex vision v.3.5 صورت گرفت.

آزمون فشاری

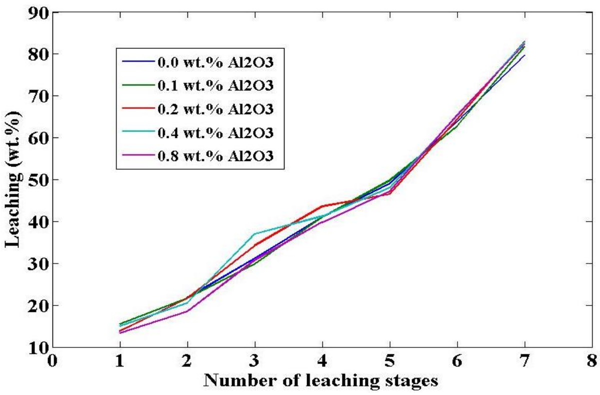
به منظور تعیین رفتار مکانیکی فوم‌های سربی حاوی مقادیر گوناگون نانو-ذرات آلومینا، از آزمون فشار استفاده شد. آزمون فشار فوم‌های تولیدی توسط دستگاه Zwick مدل Z250 انجام شد. ابتدا، فوم‌های تولید شده توسط دستگاه وایرکات (DK7735 CNC EDM wire cut machine) در جهت عمود بر محور به گونه‌ای بریده شدند که نمونه‌ای استوانه‌ای شکل با قطر mm ۱۲ و ارتفاع mm ۱۸ تولید شد. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر mm/min ۰/۱ انتخاب شد. روان‌کاری بین فک و نمونه‌ها توسط روغن‌کاری صورت گرفت. قابل ذکر است که نتایج به دست آمده بر اساس میانگین سه اندازه‌گیری است.

نتایج و بحث

انحلال دانه‌های اوره

در فرآیند تولید فوم‌های فلزی به شیوه متالورژی پودر و با استفاده از فضاساز، انحلال یا غوطه‌وری یکی از مراحل اصلی فرآیند به شمار می‌رود [13]. باید در نظر داشت که به منظور خروج فضاساز از پیش ماده فومی متراکم شده می‌توان علاوه بر روش غوطه‌وری درون حلال از روش تبخیر یا تجزیه حرارتی فضاساز نیز استفاده کرد. این قبلا اثبات شده است که فوم‌های فولادی تولید شده به روش تبخیر فضاساز دارای ویژگی‌های مکانیکی بهتری در مقایسه با فوم‌های فولادی تولید شده به روش غوطه‌وری فضاساز درون یک حلال می‌باشند [71]. فرآیند انحلال یا غوطه‌وری می‌تواند به دو صورت انحلال تک‌مرحله‌ای و انحلال چندمرحله‌ای انجام شود. در غوطه‌وری تک‌مرحله‌ای، نمونه‌های خام فشرده شده برای یک مدت زمان نسبتا طولانی درون حلال قرار می‌گیرند و این در حالی است که در غوطه‌وری چندمرحله‌ای، فرآیند انحلال درون حلال، در چندین مرحله پی‌درپی صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که بعد از هر مرحله غوطه‌وری، خشک کردن نمونه‌ها صورت می‌گیرد. در این پژوهش، فرآیند غوطه‌وری چندمرحله‌ای به دلیل داشتن مزایای بیشتری در مقایسه به غوطه‌وری تک‌مرحله‌ای [13] انتخاب شد. در این فرآیند، نمونه‌های فشرده شده درون آب مقطر غوطه‌ور شدند و بعد از خشک کردن و توزین، غوطه‌وری مجددا صورت می‌گیرد.

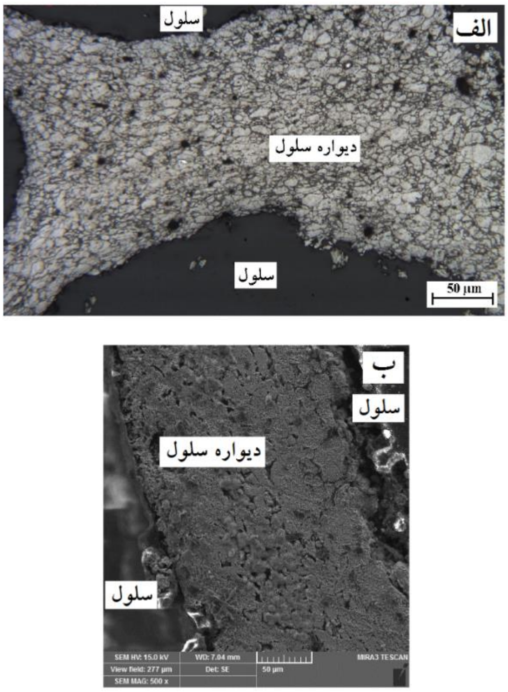
میزان خروج اوره برحسب تعداد مراحل غوطه‌وری در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است. مطابق با شکل، با افزایش دفعات غوطه‌وری، میزان انحلال دانه‌های اوره درون آب مقطر افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که افزودن نانوذرات آلومینا به نمونه‌های فومی تاثیر چندانی بر روند میزان انحلال دانه‌های اوره ندارد. جالب توجه است که شیب انحلال دانه‌های اوره در اولین مرحله غوطه‌وری نسبت به سایر مراحل آن بسیار زیادتر است. در اولین مرحله غوطه‌وری، آب مقطر در تماس با سطوح خارجی نسبتا زیادی از دانه‌های اوره قرار می‌گیرد و سرعت انحلال در حداکثر مقدار خود خواهد بود. در مراحل بعدی، مقدار سطوح خارجی دانه‌های اوره که در تماس با آب مقطر هستند، کاهش می‌یابد و در نتیجه، شیب نمودار نیز کم می‌شود. قابل ذکر است که در دو مرحله آخر غوطه‌وری، شیب انحلال مجددا افزایش می‌یابد که احتمالا به تشکیل مجاری و کانال‌های عبور آب مقطر در سطوح خارجی دانه‌های اوره و در نتیجه، افزایش سطوح تماس آب و اوره ارتباط پیدا می‌کند [25,72]. کمتر از ۲۰ درصد وزنی از دانه‌های اوره در اغلب نمونه‌های غوطه‌ور شده باقی مانده است. اوره باقیمانده در مرحله تف‌جوشی به صورت حرارتی تجزیه می‌گردد و به علت این که مجاری فراوانی در اثر انحلال اوره درون ماده ایجاد شده است، گازهای حاصل از تجزیه حرارت اوره به سهولت خارج می‌شوند و این امر از تخریب نمونه‌ها در طی فرآیند تف‌جوشی جلوگیری می‌کند.



شکل ۳ میزان انحلال دانه‌های اوره برحسب تعداد دفعات غوطه‌وری برای نمونه‌های تولیدی با مقادیر متفاوت نانوذرات آلومینا

تخلخل و ریزساختار دیواره سلول‌ها

در قطعات تولید شده به روش متالورژی پودر، عناصر آلیاژی و عملیات حرارتی تاثیر بسیار زیادی بر روی ریزساختار خواهد داشت. این در حالی است که میزان تخلخل و ریزساختار دیواره سلول‌ها نیز تاثر شدیدی بر روی رفتار مکانیکی فوم‌های فلزی دارد [10,73]. بنابراین، در این بخش به مطالعه تاثیرات میزان تخلخل و ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم‌های سربی تقویت شده با نانوذرات آلومینا پرداخته می‌شود. در شکل (۴)، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به ترتیب از نمونه‌های فوم سربی حاوی ۰/۲ و ۰/۴ درصد وزنی آلومینا نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، دیواره سلول‌ها از تف‌جوشی ذرات سرب به یکدیگر و سلول‌ها از خروج دانه‌های اوره تشکیل شده‌اند. سلول‌ها به صورت یکنواخت در ساختار متخلخل فوم‌های سربی توزیع شده‌اند که این امر به پوشش دادن یکنواخت ذرات پودرهای سربی بر روی دانه‌های اوره ارتباط پیدا می‌کند.



شکل ۴ تصاویر (الف) میکروسکوپ نوری از نمونه فوم سربی حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوذرات آلومینا و (ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه فومی سربی حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوذرات آلومینا

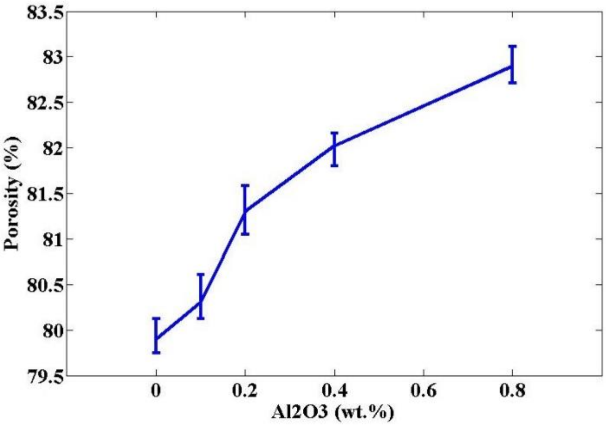
نتایج مربوط به ضخامت دیواره سلول‌ها در فوم‌های سربی که به روش پردازش تصاویر میکروسکوپی به دست آمده است در جدول (۲) گزارش شده است. باید خاطرنشان کرد که ضخامت دیواره بین دو سلول اندازه‌گیری شده است و نتایج ارائه شده بر اساس میانگین نتایج ۱۰ پردازش تصویر است. نتایج حاکی از آن است که افزودن نانوذرات آلومینا تاثیر چندانی بر روی میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها ندارد. قابل ذکر است که عوامل تولید همانند: اندازه، شکل و توزیع ذرات سرب، میزان فشار اعمالی در مرحله فشردن، دما و زمان تف‌جوشی می‌توانند بیشترین تاثیر را بر روی ضخامت دیواره سلول‌ها داشته باشند [13]. به دلیل این که عوامل تولید در این پژوهش ثابت هستند، بنابراین این انتظار وجود دارد که ضخامت دیواره سلول‌ها تاثیر چندانی از مقدار نانوذرات آلومینا نداشته باشد. میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها در همه نمونه‌های بررسی شده برابر ۱۸۹ µm است.

جدول ۲ میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها برحسب مقدار نانوذرات آلومینای افزوده شده

مقدار آلومینا (درصد وزنی)	میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها (میکرومتر)
۰	۱۸۶±۱۳
۰/۱	۱۸۸±۱۴
۰/۲	۱۹۲±۱۵
۰/۴	۱۸۹±۱۶
۰/۸	۱۸۸±۱۷

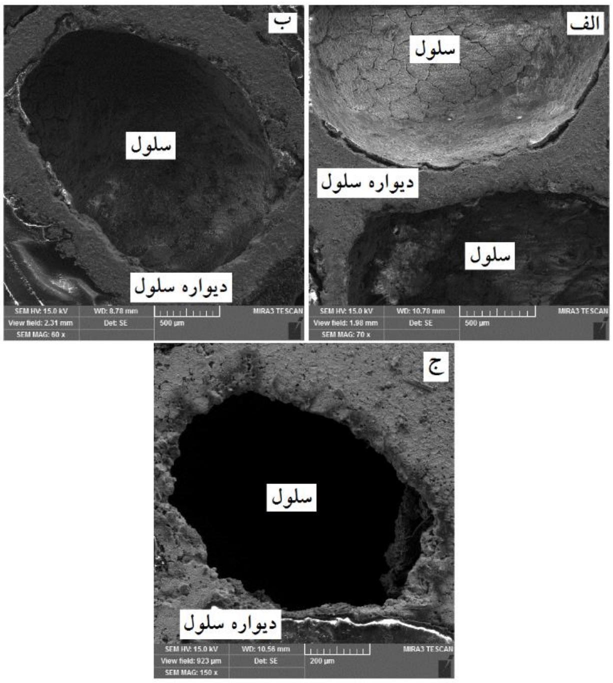
میزان تخلخل فوم‌های سربی حاوی مقادیر متفاوت نانوذرات آلومینا در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با شکل، با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا به دیواره فوم‌های سربی، میزان تخلخل افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، افزودن نانوذرات آلومینا سبب کاهش مقدار چگالی فوم‌های سربی می‌گردد. البته باید خاطرنشان کرد که میانگین تخلخل در همه نمونه‌های مطالعه شده برابر ۸۱/۲۵ درصد است و اختلاف میزان تخلخل بین نمونه بدون آلومینا و نمونه حاوی ۰/۸ درصد وزنی آلومینا تقریبا برابر ۳ درصد است که نسبتا اختلاف کمی است. افزایش درصد تخلخل و کاهش میزان چگالی در فوم‌های سربی با افزودن نانوذرات آلومینا می‌تواند به دو عامل ارتباط پیدا کند که شامل: الف) اختلاف چگالی سرب و آلومینا و ب) ممانعت نانوذرات آلومینا از متراکم شدن نمونه‌ها در مرحله فشردن است. هر چند که مقادیر افزوده شده آلومینا به

نمونه‌های تولیدی کم هستند، اما اختلاف چگالی سرب (g/cm^3 ۱۳/۳۵) با آلومینا (g/cm^3 ۳/۹۵) می‌تواند سبب اختلاف در چگالی نمونه‌های فومی و در نتیجه، سبب اختلاف در میزان تخلخل آن‌ها شود. علاوه بر این، نانوذرات سرامیکی آلومینا اغلب منجر به پایین آمدن تراکم‌پذیری پودرهای فلزی در طی فرآیند فشردن می‌شوند [74] که در نتیجه، کاهش میزان تخلخل را به ارمغان می‌آورد.



شکل ۵ میزان تخلخل برحسب درصد وزنی آلومینای افزوده شده به فوم‌های سربی

در شکل (۶)، سلول‌ها و دیواره سلول‌ها در فوم‌های سربی تقویت شده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، سلول‌ها دارای هندسه کروی هستند. هندسه سلول‌ها وابسته به شکل و هندسه دانه‌های اوره است. به دلیل این که دانه‌های اوره مورد استفاده به عنوان فضاساز دارای اشکال کروی هستند، بنابراین هندسه سلول‌ها نیز به صورت کروی شکل می‌باشند. این قبلا نشان داده شده است که در صورتی که شکل و هندسه سلول‌ها به صورت کروی باشد، فوم نهایی دارای استحکام پلاتو، میزان جذب انرژی و ضریب کشسانی بالاتری در مقایسه با محصولی است که سلول‌های مکعبی دارد [75]. علاوه بر این (همان طور که در جدول (۲) نیز ارائه شد)، ضخامت دیواره‌های سلول‌ها در اغلب نواحی تقریبا یکنواخت است. البته باید در نظر داشت که دیواره‌های مختلفی در میان سلول‌ها در ساختارهای متخلخل ایجاد می‌شود که برخی از آن‌ها بین دو سلول و برخی دیگر در میان بیشتر از دو سلول واقع می‌شوند که بحث مطرح شده در مورد ضخامت دیواره‌های بین دو سلول است. بنابراین می‌توان استدلال کرد که توزیع یکنواخت سلول‌ها وابسته به شکل و هندسه دانه‌های فضاساز و میزان یکنواختی ضخامت دیواره سلول‌ها می‌باشد. شایان توجه است که توزیع یکنواخت سلول‌ها و همچنین شکل کروی سلول‌ها سبب ایجاد رفتار مکانیکی همسانگرد در فوم‌های تولیدی خواهد شد.

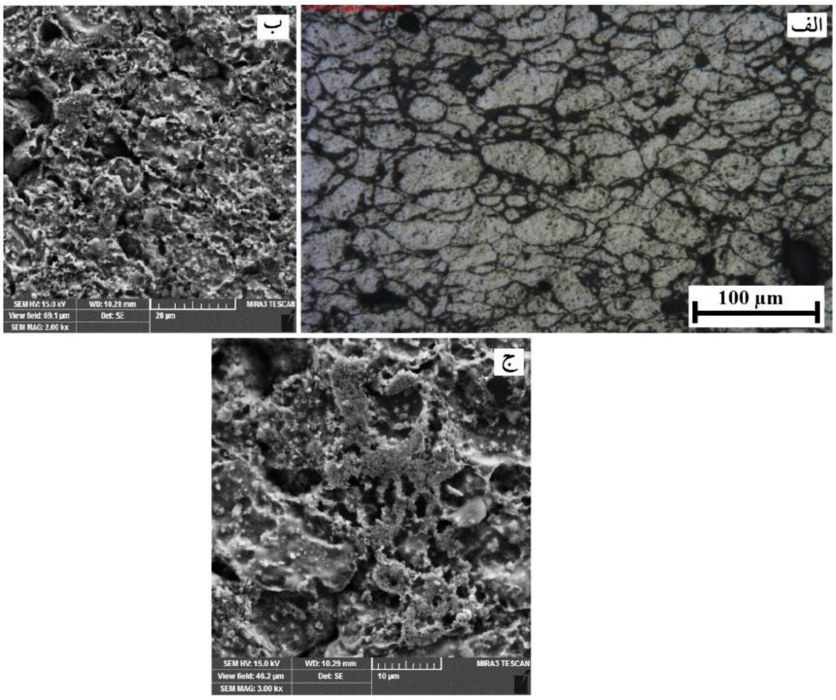


شکل ۶ سلول‌ها و دیواره سلول‌ها در فوم‌های سربی حاوی (الف) ۰/۲ درصد وزنی نانوذرات آلومینا، (ب) ۰/۴ درصد وزنی نانوذرات آلومینا و (ج) ۰/۸ درصد وزنی نانوذرات آلومینا

علاوه بر میزان تخلخل، ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم‌های فلزی نیز شدیدا بر رفتار مکانیکی آن‌ها تاثیرگذار خواهد بود. در شکل (۷)، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم‌های تولیدی نشان داده شده است. در طی فرآیند تف‌جوشی، پدیده نفوذ اتمی در مرزهای ذرات پودر سرب رخ می‌دهد که در نتیجه، ذرات به یکدیگر متصل می‌شوند. در مرحله فشردن، ذرات پودر به صورت مکانیکی به یکدیگر متصل می‌شوند، ولی حفرات بسیاری بین آن‌ها باقی می‌ماند. در حین تف‌جوشی، نفوذ اتمی سبب کاهش اندازه حفرات و ایجاد اتصالات متالورژیکی می‌گردد که بعد از تف‌جوشی، میزان حفرات باقیمانده بسیار کم خواهد بود [76]. در تصاویر میکروسکوپی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در شکل (۷)، اتصال بسیار خوب ذرات پودر سرب به یکدیگر و همچنین تشکیل حفرات بسیار کمی در ریزساختار دیواره

سلول‌ها نشان داده شده است. علاوه بر این، دانه‌ها و مرزدانه‌های یک فاز که از سرب خالص تشکیل شده است، به صورت واضح مشاهده می‌شود.

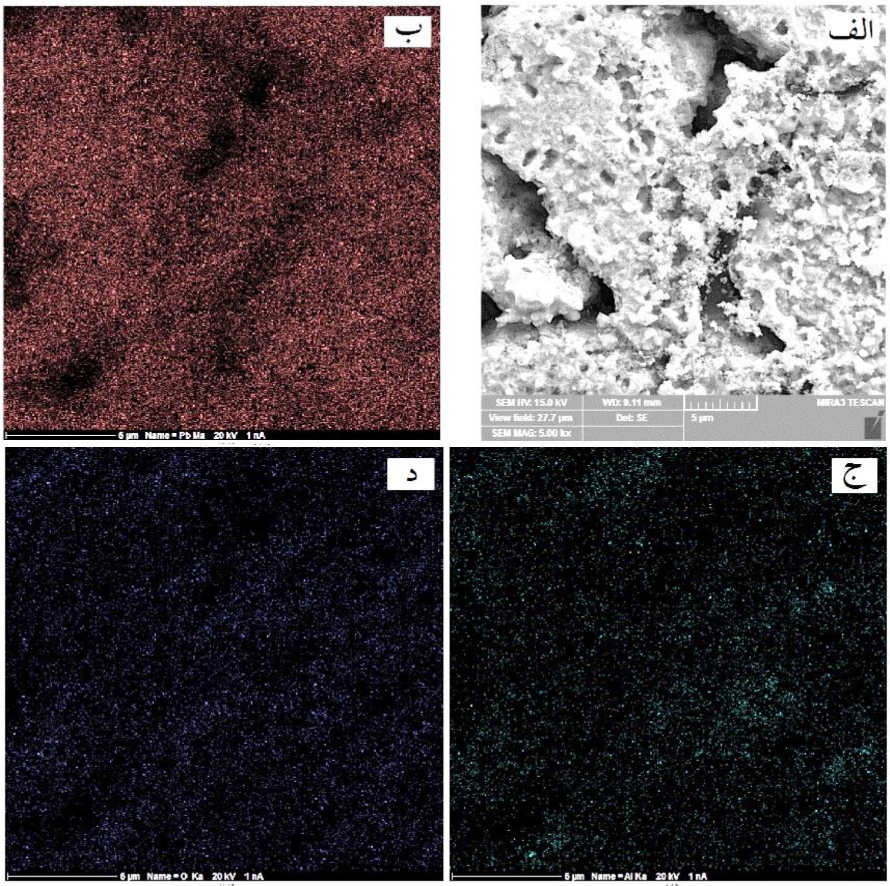
در شکل (۸)، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات آلومینا در میان ریزساختار دیواره سلول‌های فوم سربی حاوی ۰/۴ درصد وزنی آلومینا نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نانوذرات آلومینا درون دیواره قرار گرفته‌اند. البته توپوگرافی سطح در این مقیاس دارای اختلاف سطح بسیار زیادی است. در شکل (۹)، نقشه‌ی اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی از دیواره سلول فوم سربی حاوی ۰/۴ درصد وزنی آلومینا نشان داده شده است. توزیع عناصر سرب، آلومینیوم و اکسیژن در اشکال (۹–ب) تا (۹–د) مشاهده می‌شود. توزیع نسبتا یکنواخت عناصر آلومینیوم و اکسیژن اثبات می‌کند که نانوذرات آلومینا به صورت یکنواخت در دیواره سلول‌ها جای گرفته‌اند. به بیان دیگر، در فرآیند اختلاط نانوذرات آلومینا با ذرات سرب، توزیع ذرات به صورت یکنواخت انجام شده است.



شکل ۷ تصاویر (الف) میکروسکوپ نوری از ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم سربی بدون آلومینا، (ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم سربی حاوی ۰/۱ درصد وزنی آلومینا و (ج) میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم سربی حاوی ۰/۳ درصد وزنی آلومینا



شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات آلومینا قرار گرفته در دیواره سلول‌ها



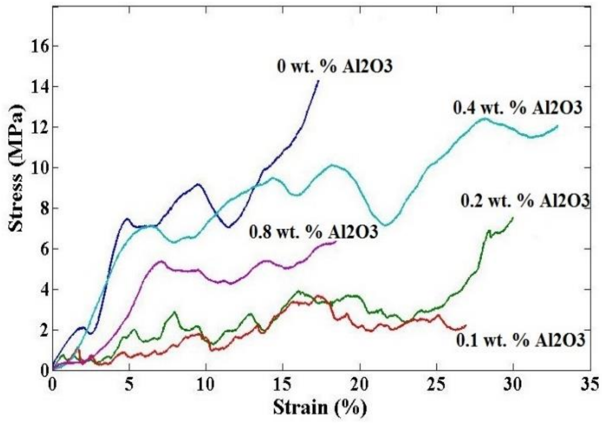
شکل ۹ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی و نقشه‌های اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی برای عناصر، (ب) سرب، (ج) آلومینیوم و (د) اکسیژن

رفتار فشاری فوم‌های سربی

در شکل (۱۰)، منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فوم‌های سربی حاوی مقادیر مختلف نانوذرات آلومینا به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌ها به صورت دندانه اره‌ای هستند. به بیان دیگر، قله‌ها و دره‌های تنشی در همه منحنی‌های تنش-کرنش فشاری به صورت واضح دیده می‌شود. در ابتداء، فوم‌های سربی در برابر تنش فشاری اعمالی مقاومت می‌کنند و در نتیجه، مقدار تنش افزایش می‌یابد که سبب تشکیل قله تنشی می‌گردد. در ادامه، احتمالا یک شکست در دیواره سلول‌هایی که در امتداد یک ردیفی از سلول‌ها واقع شده‌اند، رخ می‌دهد [11,13,28,69] که در نتیجه، مقدار تنش افت می‌کند و موجب تشکیل دره تنشی می‌گردد. این احتمال وجود دارد که با افزایش تعداد نوسانات تنشی یا همان قله‌ها و دره‌ها، میزان جذب انرژی در مواد فومی افزایش یابد [13]. در نمونه بدون نانوذرات آلومینا، ارتفاع و پهنای قله‌ها و دره‌های تنشی زیادتر از سایر نمونه‌ها است. این در حالی است که در فوم سربی حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات آلومینا، تعداد نوسانات تنشی نسبت به فوم بدون نانوذرات بسیار بیشتر و ارتفاع و پهنای قله‌ها و دره‌های تنشی خیلی کمتر می‌باشد. علاوه بر این، با افزایش مقادیر نانوذرات آلومینا از ۰/۱ تا ۰/۸ درصد وزنی، از تعداد نوسانات تنشی کاسته می‌شود.

با افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات آلومینا، منحنی تنش-کرنش در مقایسه با منحنی فوم تقویت نشده، به سمت پایین و راست شیفت پیدا می‌کند. در ادامه، با افزودن مقادیر بیشتر نانوذرات تا ۰/۴ درصد وزنی، منحنی‌ها به سمت بالا و راست کشیده می‌شوند. البته، در منحنی تنش-کرنش فوم حاوی ۰/۸ درصد وزنی نانوذرات آلومینا، افت منحنی به سمت پایین و چپ مشاهده می‌گردد. رفتار مکانیکی فوم‌های حاوی مقادیر مختلف نانوذرات آلومینا را می‌توان به دو بخش کشسان و مومسان تقسیم‌بندی کرد. همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده

می‌شود، بخش کشسان در مقایسه با بخش مومسان بسیار کوچک است. در ابتداء، با اعمال تنش فشاری، تغییرشکل کشسان در نمونه‌های فومی ایجاد می‌شود تا این که در نزدیکی اولین قله تنشی، رفتار به مومسان تغییر می‌کند. در ناحیه تغییرشکل مومسان، پلاتوی دندانه اره‌ای نسبتا گسترده‌ای به وجود می‌آید و قله‌ها و دره‌های تنشی در ناحیه پلاتو تا شکست نهایی فوم‌های سربی ادامه پیدا می‌کنند. در همه نمونه‌های فومی، افزایش تنش (یا تشکیل قله تنشی) تا قبل از شکست اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰ منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فوم‌های تولیدی

در جدول (۳)، ویژگی‌های مکانیکی به دست آمده از منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فوم‌های سربی حاوی مقادیر مختلف نانوذرات آلومینا ارائه شده است. در مقادیر کم نانوذرات آلومینا (۰/۱ درصد وزنی)، میانگین مقادیر به دست آمده برای تنش پلاتو، انرژی جذب شده و کرنش نقطه شکست نسبت به فوم سربی بدون آلومینا کاهش پیدا می‌کند. سپس، با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا تا ۰/۴ درصد وزنی، کمیت‌های اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابند. این در حالی است که با افزودن ۰/۸ درصد وزنی نانوذرات آلومینا به فوم‌های سربی، مقادیر تنش پلاتو، انرژی جذب شده و کرنش نقطه شکست کاهش می‌یابند. بنابراین، بهینه مقدار افزودن نانوذرات آلومینا به فوم‌های سربی برابر ۰/۴ درصد وزنی است.

جدول ۳ میانگین ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولید شده

مقدار آلومینا (درصد وزنی)	تنش پلاتو (MPa)	انرژی جذب شده (Nm)	کرنش نقطه شکست (٪)
۰	۷/۹۲	۲۸۷/۲	۱۷/۲۴
۰/۱	۱/۹۵	۱۱۲/۳	۲۷/۴۶
۰/۲	۲/۹۷	۱۹۳/۸	۳۰/۸۷
۰/۴	۸/۴۶	۵۱۶/۶	۳۳/۱۸
۰/۸	۴/۳۱	۱۶۸/۴	۱۸/۹۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فوم‌های سربی حاوی ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی نانوذرات آلومینا به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضاساز به صورت موفقیت‌آمیز تولید شدند و نتایج اصلی زیر به دست آمد.

۱. انحلال دانه‌های اوره در طی هفت مرحله درون آب مقطر صورت گرفت و بیشتر از ۸۰ درصد وزنی اوره خارج شد.
۲. در طی فرآیند تف‌جوشی، دانه‌های سرب به خوب به یکدیگر متصل شدند و دیواره‌های سلول‌ها با میانگین ضخامت در حدود ۱۸۹ μm تشکیل شد.
۳. افزودن نانوذرات آلومینا سبب افزایش میزان تخلخل فوم‌های سربی در حدود ۳/۷۵ درصد شده است.
۴. سلول‌های تشکیل شده در فوم‌های سربی دارای اشکال کروی هستند و نانوذرات آلومینا به صورت یکنواخت در دیواره سلول‌ها توزیع شده‌اند.
۵. با افزودن نانوذرات آلومینا تا ۰/۴ درصد وزنی، رفتار فشاری فوم‌های تقویت شده بهبود می‌یابد و بعد از آن، با افزودن ۰/۸ درصد وزنی آلومینا، افت پیدا می‌کند. بالاترین میزان مقاومت در برابر ضربه و تنش فشاری تحمل شده در ۰/۴ درصد وزنی آلومینا به‌ترتیب، ۵۱۶/۶ Nm و ۸/۴۶ MPa ثبت شدند.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Banhart, “Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams,” *Progressive Materials Science*, vol. 200, no. 46, pp. 559-632, (2001). https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5

[2] B.H. Smith, S. Szyniszewski, J.F. Hajjar, B.W. Schafer and S.R. Arwade, "Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties" *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 71, pp. 1-10, (2012). https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.028

[3] H. P. Degischer, B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals Production, *Processing and Applications*, Wiley-VCH/Verlag GmbH, (2002).

[4] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, (2000).

[5] A. Pandey, R. Dubey, H. Jain, A. Abhas, R. Kumar, G.K. Gupta, S. Siram, V. Chilla and D.P. Mondal, "Effect of cell size on the microarchitectural and physicomechanical response in open-cell Al foam made through template method," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 296, pp. 127341, (2023). https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127341

[6] Z. Xu, D. Shen, K. Wang, P. He, J. Zhang, H. Zhang, P. Cao, S. Huang, J. Peng, Q. Shen and C. Wang and L. Zhang, "*Synthesis of a novel Al foam with a periodic architecture by introducing hollow Al tubes and Al/Mg powders*" Journal of Materials Science and Technology, vol. 148, pp. 105-115, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.10.037

[7] W. Fu, Y. Du, J. Jing, C. Fu and M. Zhou, "Highly selective nitrate reduction to ammonia on CoO/Cu foam via constructing interfacial electric field to tune adsorption of reactants," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 324, pp.122201, (2023). https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.122201

[8] P. Jenei, C. Kadar, A. Szabo, S. M. Hung, C. J. Kuo, H. Choe and J. Gubicza, "Mechanical behavior of freeze-cast Ti foams with varied porosity," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 855, pp. 143911, (2022). https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143911

[9] Z. Feng, L. Zhang, W. Chen, Z. Peng and Y. Li, "A strategy for supportless sensors: Fluorine doped TiO2 nanosheets directly grown onto Ti foam enabling highly sensitive detection toward acetone," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 322, pp. 128633, (2020). https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128633

[10] H. Sazegaran, S. M. Moosavi Nezhad, "Cell morphology, porosity, microstructure and mechanical properties of porous Fe-C-P alloys," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, pp. 257-265, (2021). https://doi.org/10.1007/s12613-020-1995-2

[11] H. Sazegaran, M. Hojati, "Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams," *International Journal of Minerals, Metallurgy, Materials*, vol. 26, pp. 588-596, (2019). https://doi.org/10.1007/s12613-019-1767-z

[12] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid and J. Vahdati Khaki, "Effects of sphere size on the microstructure and mechanical properties of ductile iron–steel hollow sphere syntactic foams," I*nternational Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 23, pp. 676-682, (2016). https://doi.org/10.1007/s12613-016-1280-6

[13] H. Sazegaran, "Investigation on Production Parameters of Steel Foam Manufactured Through Powder Metallurgical Space Holder Technique," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3371-3384, (2021). https://doi.org/10.1007/s12540-020-00659-z

[14] G. Pia, F. Delogu, “Hardening of nanoporous Au foams induced by surface chemistry,” *Materials Letters*, vol. 196, pp. 332-334, (2017). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.096

[15] M. Liu, Z. Li, F. Li, Q. Jin, X. Yang and C. Xia, “Mechanical properties and in vitro biodegradation behavior of GASAR porous Mg-Ag alloy,” *Materials Letters*, vol. 315, pp. 131920, (2022). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131920

[16] H.J. Kim, D.S. Shim, “Compressive properties of AlSi10Mg foams additively manufactured with different foaming agents TiH2 and ZrH2,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 94, pp. 63-68, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.064

[17] S. Wi, U. Berardi, S. D. Loreto and S. Kim, “Microstructure and thermal characterization of aerogel-graphite polyurethane spray-foam composite for high efficiency thermal energy utilization,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 397, pp. 122656, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122656

[18] G. Yuan, Y. Li, L. Hu and W. Fu, “Preparation of shaped aluminum foam parts by investment casting,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 314, pp. 117897, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117897

[19] M. Firoozbakht, A. Blond, G. Zimmermann, A. C. Kaya, C. Fleck and A. Buhrig-Polaczek, “Analyzing the influence of the investment casting process parameters on microstructure and mechanical properties of open-pore Al-7Si foams,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 2123-2135, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.167

[20] G. Yuan, Y. Li, X. Zhou and L. Hu, “Preparation of complex shaped aluminum foam by a novel casting-foaming method”, *Materials Letters*, vol. 293, 129673, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129673

[21] S. Cao, N. Ma, Y. Zhang, R. Bo and Y. Lu, “Fabrication, mechanical properties, and multifunctionalities of particle reinforced foams: A review”, *Thin-Walled Structures*, vol. 186, 110678, (2023). https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110678

[22] A. Sinha, A. Cherdantsev, K. Johnson, J. Vasques and D. Hann, “How do the liquid properties affect the entrapment of bubbles in gas sheared liquid flows”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 92, pp. 108878, (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108878

[23] T. Yi Lim, W. Zhai, X. Song, X. Yu, T. Li, B. W. Chua and F. Cui, “Effect of slurry composition on the microstructure and mechanical properties of SS316L open-cell foam”, *Materials Science and Engineering:* A, vol. 772, 138798, (2020). https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138798

[24] N.S. K. Ho, P. Li, S. Raghavan and T. Li, “The effect of slurry composition on the microstructure and mechanical properties of open-cell Inconel foams manufactured by the slurry coating technique”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 687, pp. 123-130, (2017). https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.038

[25] H. Sazegaran, M. Fazeli, M. Ganjeh and H. Nasiri, “Effect of Molybdenum Addition on Microstructural and Mechanical Characterization of Highly Porous Steels”, *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 5228-5238, (2021). https://doi.org/10.1007/s12540-020-00790-x

[26] H. Sazegaran, A. Feizi and M. Hojati, “Effect of Cr Contents on the Porosity Percentage, Microstructure, and Mechanical Properties of Steel Foams Manufactured by Powder Metallurgy”, *Transactions of the Indian Institute of*

Metals, vol. 72, pp. 2819-2826, (2019). https://doi.org/10.1007/s12666-019-01758-1

[27] M. Sharma, O. P. Modi and P. Kumar, “Synthesis and characterization of copper foams through a powder metallurgy route using a compressible and lubricant space-holder material”, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 25, pp. 902-912, (2018). https://doi.org/10.1007/s12613-018-1639-y

[28] H. Jain, D. P. Mondal, G. Gupta and R. Kumar, “Effect of compressive strain rate on the deformation behaviour of austenitic stainless steel foam produced by space holder technique”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 259, pp. 124010, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124010

[29] S. Sathaiah, R. Dubey, A. Pandey, N. R. Gorhe, T. C. Joshi, V. Chilla, D. Muchhala and D. P. Mondal, “Effect of spherical and cubical space holders on the microstructural characteristics and its consequences on mechanical and thermal properties of open-cell aluminum foam,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 273, pp. 125115, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125115

[30] S. Guarino, M. Barletta, S. Pezzola and S. Vesco, “Manufacturing of steel foams by Slip Reaction Foam Sintering (SRFS)”, *Materials and Design*, vol. 40, pp. 268-275, (2012). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.022

[31] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid and J. Vahdati Khaki, “Effects of copper content on the shell characteristics of hollow steel spheres manufactured using an advanced powder metallurgy technique”, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 23, pp. 434-441, (2016). https://doi.org/10.1007/s12613-016-1253-9

[32] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid and J. Vahdati Khaki, “Effects of sphere size on the microstructure and mechanical properties of ductile iron–steel hollow sphere syntactic foams”, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 23, pp. 676-682, (2016). https://doi.org/10.1007/s12613-016-1280-6

[33] T. Wan, Y. Liu, C. Zhou, X. Chen and Y. Li, “Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review”, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 62, pp. 11-24, (2021). https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.039

[34] X. Zheng, H. Lee, T.H. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E.B. Duoss, J.D. Kuntz, M.M. Biener, Q. Ge, J.A. Jackson, S.O. Kucheyev, N.X. Fang and C.M. Spadaccini, “Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials,” *Science*, vol. 344, pp. 1373-1377, (2014). https://doi.org/10.1126/science.1252291

[35] I. A. Figueroa, I. Mendieta, M. F. Azamar, G. A. Lara-Rodríguez and O. Novelo-Peralta, “Mechanical behavior of heat-treated Al-Cu-Mg open-cell foams”, *Materials Letters*, vol. 284, pp.129021, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129021

[36] B. Soni, S. Biswas, “Evaluation of mechanical properties under quasi-static compression of open-cell foams of 6061-T6 Al alloy fabricated by pressurized salt infiltration casting method”, *Materials Characterization*, vol. 130, pp. 198-203, (2017). https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.008

[37] D. Yang, Z. Hu, W. Chen, J. Lu, J. Chen, H. Wang, L. Wang, J. Jiang and A. Ma, “Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties”, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 290-296, (2016). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.003

[38] H. Leda, “Phase transformations and mechanical properties of steels containing 0.6% C, 0.7-1.4% Mn and

microalloyed with V and Ti", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 64, no. 1-3, pp. 247-254, (1997). https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02574-5

[39] M.T. Chen, A. Cai, M. Pandey, C. Shen, Y. Zhang and L. Hu, "Mechanical properties of high strength steels and weld metals at arctic low temperatures", *Thin-Walled Structures*, vol. 185, pp. 110543, (2023). https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02574-5

[40] S. Cao, N. Ma, Y. Zhang, R. Bo and Y. Lu, "Fabrication, mechanical properties, and multifunctionalities of particle reinforced foams: A review", *Thin-Walled Structures*, vol. 186, pp. 110678, (2023). https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110678

[41] H. Jain, D.P. Mondal, G. Gupta and R. Kumar, "Silver flowers decorated open cell stainless steel foam for bone scaffold application", *Materials Today Communications*, vol. 34, pp. 105392, (2023). https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105392

[42] A.A. Hariri, S. Selimli and H. Dumrul, "Effectiveness of heat sink fin position on photovoltaic thermal collector cooling supported by paraffin and steel foam: An experimental study", *Applied Thermal Engineering*, vol. 213, pp. 118784, (2022). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118784

[43] H. Jain, R. Kumar, G. Gupta and D.P. Mondal, "Microstructure, mechanical and EMI shielding performance in open cell austenitic stainless steel foam made through PU foam template", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 241, pp.122273, (2020). https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122273

[44] M. Su, Q. Zhou and H. Wang, "Mechanical properties and constitutive models of foamed steels under monotonic and cyclic loading", *Construction and Building Materials*, vol. 231, pp. 116959, (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116959

[45] M. Tavares, J.M. Weigand, L.C.M. Vieira, S.J.C. Almeida and S. Szyniszewski, "Mechanical behavior of steel and aluminum foams at elevated temperatures. Local buckling based approach toward understanding of the material system behavior", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 181, pp. 105754, (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116959

[46] I. Mutlu, E. Oktay, "Influence of Fluoride Content of Artificial Saliva on Metal Release from 17-4 PH Stainless Steel Foam for Dental Implant Applications", *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 582-588, (2013). https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.03.006

[47] M. Madgule, C.G. Sreenivasa and A.V. Borgaonkar, "Aluminium metal foam production methods, properties and applications- a review", *Materials Today: Proceedings*, vol. 77, pp. 673-679, (2023). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287

[48] A. Lomte, B. Sharma, M. Drouin and D. Schaffarzick, "Sound absorption and transmission loss properties of open-celled aluminum foams with stepwise relative density gradients", *Applied Acoustics*, vol. 193, pp. 108780, (2022). https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108780

[49] W.C. Feng, B. Ding, Y. Zhang, M.F. Mu and L. Gong, "How can copper foam better promote the melting process of phase change materials", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 187, pp. 108199, (2023). https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108199

[50] M. Cen, S. Deng, C. Hu, J. Luo, S. Tan, C. Wang and Y. Wu, "Enhanced boiling heat transfer of HFE-7100 on copper foams under overflow conditions", *Applied Thermal Engineering*, vol. 224, pp. 120083, (2023). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120083

[51] X. Wei, N. Zhang, Z. Peng, X. Li, Y. Du and Y. Yuan, "Local optimization strategy of copper foam on heat transfer enhancement for phase change materials", *Journal of Energy Storage*, vol. 58, pp. 106407, (2023). https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106407

[52] Y. Diao, Z. Wang, Y. Zhao, Z. Wang, C. Chen and D. Zhang, "Heat transfer enhancement of a multichannel flat tube-copper foam latent heat storage unit", *Applied Thermal Engineering*, vol. 229, pp. 120559, (2023). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120559

[53] J. Zou, X. Meng, "Investigating the effect of distribution form of copper foam fins on the thermal performance improvement of latent thermal energy storage units", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 141, pp. 106571, (2023). https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106571

[54] A. Devikar, D. Bhosale, K. Georgy, M. Mukherjee and G.S.V. Kumar, "Effect of beryllium on the stabilization of Mg-3Ca alloy foams", *Materials Science and Engineering: B*, vol. 286, pp. 116007, (2022). https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116007

[55] H. Qu, D. Rao, J. Cui, N. Gupta, H. Wang, Y. Chen, A. Li and L. Pan, "Mg-matrix syntactic foam filled with alumina hollow spheres coated by MgO synthesized with solution coating-sintering", J*ournal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 2357-2371, (2023). https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.160

[56] D. Yang, S. Guo, J. Chen, C. Qiu, S. O. Agbedor, A. Ma, J. Jiang and L. Wang, "Preparation principle and compression properties of cellular Mg-Al-Zn alloy foams fabricated by the gas release reaction powder metallurgy approach", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, pp. 158112, (2021). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.(2020).158112

[57] A. Abhash, P. Singh, R. Kumar, S. Pandey, S. Sathaiah, M.M. Shafeeq and D.P. Mondal, "Effect of Al addition and space holder content on microstructure and mechanical properties of Ti2Co alloys foams for bone scaffold application", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 109, pp. 110600, (2020). https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110600

[58] Q. Wang, L. Qiu, X. Tan, Z. Liu, S. Gao and R. Wang, "Amorphous TiO2 granular nanodisks on porous Ti foam for highly effective solar cells and photocatalysts", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 102, pp. 85-91, (2019). https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.05.007

[59] M. Shbeh, Z. J. Wally, M. Elbadawi, M. Mosalagae, H. Al-Alak, G. C. Reilly and R Goodall, "Incorporation of HA into porous titanium to form Ti-HA biocomposite foams", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 96, pp. 193-203, (2019). https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.04.043

[60] J. H. Cho, J. J. Rha, G. Y. Lee, H. Jeon and J. Y. Kim, "Microstructure and mechanical properties of open-cell Ni-foams with hollow struts and NiO oxide layers", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 863, pp. 144519, (2023). https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144519

[61] Y.F. Li, Bing Li, Y.H. Song, L. Ding, G.D. Yang, J. Lin, X.L. Wu, J.P. Zhang, C. Shao and H.Z. Sun, "A neotype

carbon-based Ni foam achieved by commercial strategy towards smooth and light Li metal anodes", *Electrochimica Acta*, vol. 437, pp. 141530, (2023). https://doi.org/10.1016/j.electacta.(2022).141530

[62] L. Zhu, X. Tong, Z. Ye, Z. Lin, T. Zhou, S. Huang, Y. Li, J. Lin, C. Wen and J. Ma, "Zinc phosphate, zinc oxide, and their dual-phase coatings on pure Zn foam with good corrosion resistance, cytocompatibility, and antibacterial ability for potential biodegradable bone-implant applications", *Chemical Engineering Journal*, vol. 450, pp. 137946, (2022). https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137946

[63] M. Mohbe, D.P. Mondal, "Properties of Zn foam filled with cenosphere microballoons", *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 7448-7451, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.073

[64] G. Pia, F. Delogu, "Hardening of nanoporous Au foams induced by surface chemistry", *Materials Letters*, vol. 196, pp. 332-334, (2017). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.096

[65] K. Yanamandra, D. Pinisetty and N. Gupta, "Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, pp. 113078, (2023). https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113078

[66] G. Costanza, M. E. Tata, "Recycling of Exhaust Batteries in Lead-Foam Electrodes", *Rewas*, vol. 914, pp. 272-278, (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48763-2_28

[67] A. Irretier, J. Banhart, "Lead and lead alloy foams", *Acta Materialia*, vol. 53, no. 18, pp. 4903-4917, (2005). https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.07.007

[68] S.M. Tabaatabaai, M.S. Rahmanifar, S.A. Mousavi, S. Shekofteh, J. Khonsari, A. Oweisi, M. Hejabi, H. Tabrizi, S. Shirzadi and B. Cheraghi, "Lead-acid batteries with foam grids", *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 879-884, (2006). https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.017

[69] N. Bekoz, E. Oktay, "High temperature mechanical properties of low alloy steel foams produced by powder metallurgy", *Materials and Design*, vol. 53, pp. 482-489, (2014). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.050

[70] N. Bekoz, E. Oktay, "Effect of heat treatment on mechanical properties of low alloy steel foams", *Materials and Design*, vol. 51, pp. 212-218, (2013). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.050

[71] H. Jain, D.P. Mondal, G. Gupta, R. Kumar and S. Singh, "Synthesis and characterization of 316L stainless steel foam made through two different removal process of space holder method", *Manufacturing Letters*, vol. 26, pp. 33-36, (2020). https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.09.005

[72] M. Mirzae, M. H. Paydar, "A novel process for manufacturing porous 316L stainless steel with uniform pore distribution", *Materials and Design*, vol. 121, pp. 442-449, (2017). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.069

[73] N. Bekoz E. Oktay, "The role of pore wall microstructure and micropores on the mechanical properties of Cu-Ni-Mo based steel foams," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 612, pp. 387-397, (2014). https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.064

[74] W.S. Barakat, A. Wagih, O.A. Elkady, A. Abu-Oqail, A. Fathy and A. EL-Nikhaily, "Effect of Al2O3 nanoparticles content and compaction temperature on properties of Al-Al2O3 coated Cu nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, pp. 107140, (2019). https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107140

[75] H. Jain, G. Gupta, D.P. Mondal, A. K. Srivastava, A. Pandey, S. k. Srivastava and R. Kumar, “Effect of particle shape on microstructure and compressive response of 316L SS foam by space holder technique”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 271, pp.124924, (2021). https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124924

[76] Y.H. Geng, P.H. Wang, “Effect of glass fibre (GF) addition on microstructure and tensile property of GF/Pb composites fabricated by powder metallurgy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 26, no. 10, pp. 2672-2678, (2016). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64394-7